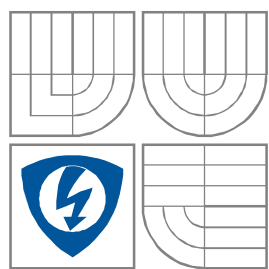


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

MĚŘENÍ PIEZOELEKTRICKÉHO NÁBOJOVÉHO KOEFIGIENTU

MEASUREMENT OF THE PIEZOELECTRIC CHARGE COEFFICIENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR
VEDOUČÍ PRÁCE
SUPERVISOR

DAVID STEHNO

ING. JIŘÍ FIALKA

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Automatizační a měřicí technika

Student: David Stehno
Ročník: 3

ID: 115278
Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Měření piezoelektrického nábojového koeficientu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je teoreticky nastudovat problematiku měření materiálových koeficientů piezoelektrické keramiky, především pak piezoelektrického nábojového koeficientu. Nastudovat možné způsoby určení této konstanty a ty pak ověřit vlastním měřením v laboratoři na vybraných vzorcích piezoelektrických materiálů. Nastudovat pojem nejistota měření a stanovit nejistoty měření jednotlivých metod pro určení piezoelektrického nábojového koeficientu a diskutovat vliv jednotlivých zdrojů nejistot na výsledné hodnoty. Dosažené výsledky přehledně zpracovat do výstupní práce.

1. Teoretické nastudování problematiky piezoelektrických materiálů a měření hlavních materiálových koeficientů. Nastudovat všechny možné metody pro měření piezoelektrické nábojové konstanty.
2. Provést měření piezoelektrické nábojové konstanty pomocí všech metod, které lze uskutečnit v laboratorních podmínkách.
3. Vyzkoušené metody vzájemně porovnat pomocí naměřených hodnot a hodnot udávaných výrobcem piezoelektrické keramiky.
4. Vypočítat nejistoty jednotlivých metod.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

J.W. Waanders, Piezoelectric Ceramics: Properties and Applications, Philips Components, Eindhoven - The Netherlands, First edition 4-91, ISBN 9398 651-80011

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 30.5.2011

Vedoucí práce: Ing. Jiří Fialka

prof. Ing. Pavel Jura, CSc.
Předseda oborové rady

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce bylo teoreticky nastudovat určování piezoelektrických koeficientů, zejména piezoelektrického nábojového koeficientu a pomocí různých metod měření určit tento koeficient. Dále nastudovat problematiku určování nejistot a určit nejistoty měření. Měření bylo prováděno na vzorcích ve tvaru válečku, jednotlivé vzorky měly různé rozměry. Jednalo se o materiál typu PCM51 a PCM41.

Měření piezoelektrického nábojového koeficientu se provádělo pomocí tří metod a to frekvenční, přímou a kvazistatickou. Výsledky dosažené všemi metodami jsou v závěru práce porovnány a u každé metody jsou vypočítány a diskutovány nejistoty měření.

Klíčová slova

Piezoelektrická jev, piezoelektrické konstanty, polarizace, interferometr, nejistoty měření

Abstract

The thesis aim was to study in theory the determination of piezoelectric coefficients, in particular piezoelectric coefficient of charge and to use different measurement methods to determine this factor. Also to further study the issue of determining the uncertainties and determine the measurement uncertainty. Measurements were conducted on cylinder-shaped samples, with different dimensions of individual samples. With type material PCM51 and PCM41.

Piezoelectric coefficient measurements of charge was carried out using three methods: frequency, direct and quasi-static. The results achieved by all methods are compared at the end of this study and the measurements uncertainty are calculated and discussed for each method.

Keywords

Piezoelectric effect, piezoelectric constants, polarization, interferometry, uncertainty of measurement

Bibliografická citace:

STEHNO, D. Měření piezoelektrického nábojového koeficientu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 52 s. Vedoucí bakalářské práce byl Ing. Jiří Fialka.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Měření piezoelektrického nábojového koeficientu jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **23. května 2011**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Fialkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: **23. května 2011**

.....
podpis autora

Obsah

1	Piezoelektrický jev	10
1.1	Piezokeramika	10
1.2	Rozdělení materiálů	11
1.3	Využití piezoelektrického jevu	11
1.4	Piezoelektrické konstanty	12
1.4.1	Piezoelektrická deformační konstanta h_{ij} [9]	12
1.4.2	Elektromechanický koeficient vazby k_{ij} [9]	13
1.4.3	Piezoelektrický nábojový koeficient d_{ij} [9]	13
1.5	Náhradní obvod piezoelektrického rezonátoru	14
2	Nejistoty měření	16
2.1	Úvod	16
2.2	Typy nejistot	16
2.2.1	Nejistota typu A	16
2.2.2	Nejistota typu B	17
2.2.3	Nejistota typu C	18
2.2.4	Rozšířená nejistota	18
3	Frekvenční metoda	19
4	Přímá metoda	20
5	Kvazistatická metoda	21
6	Praktická měření	22
6.1	Měření frekvenční metodou	22
6.1.1	Měření pomocí RLC metru	22
6.1.2	Měření s generátorem a voltmetrem	29
6.1.3	Použití impedančního analyzátoru	34
6.2	Měření přímou metodou	36
6.3	Měření kvazistatickou metodou	41
6.4	Srovnání všech metod	46
7	Závěr	47
8	Literatura	48
9	Přílohy	51

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1: Uspořádání domén a) před polarizací, b) během polarizace, c) po polarizaci [15]	11
Obrázek 1.2: Směry sil ovlivňující piezoelektrický prvek [3]	12
Obrázek 1.3: Náhradní schéma piezoelektrického rezonátoru v okolí h-té rezonance [17]	14
Obrázek 2.1: Tabulka koeficientů rozšíření	18
Obrázek 3.1: Ideální frekvenční průběh měniče	19
Obrázek 4.1: Schéma zapojení pro měření kvazistatickou metodou	21
Obr 4.2: Schéma zapojení pro měření pomocí RLC metru HIOKI	23
Obrázek 4.3: Impedanční a fázová charakteristika vzorku č.1	29
Obrázek 4.4: Schéma zapojení pro měření frekvenční metodou s generátorem a voltmetrem	30
Obrázek 4.5: Schéma zapojení pro měření s impedančním analyzátozem	34
Obrázek 4.6: Měřicí stanoviště pro měření pomocí interferometru	36
Obrázek 4.7: Výstupní signál z interferometru Polytec OFV-5000	40
Obrázek 4.8: Výstup interferometru při odpojení napětí a dupnutí	41
Obrázek 4.10. Měřicí stanoviště pro měření kvazistatickou metodou	42
Obrázek 9.1: Datasheet od firmy PIEZOCERAM s.r.o. [5]	51
Obrázek 9.2: Měřicí pracoviště metody s RLC metrem HIOKI 3532	52
Obrázek 9.3: Měřicí stanoviště pro měření přímou metodou s interferometrem	52

1 PIEZOELEKTRICKÝ JEV

První zmínka o piezoelektrickém jevu je z minulého století, kdy v Indii a na Ceyloně bylo vypořádováno, že když byly krystaly turmalínu vhozeny do žhavého popela, tak se částičky popela nejprve přitahovaly a pak odpuzovaly.

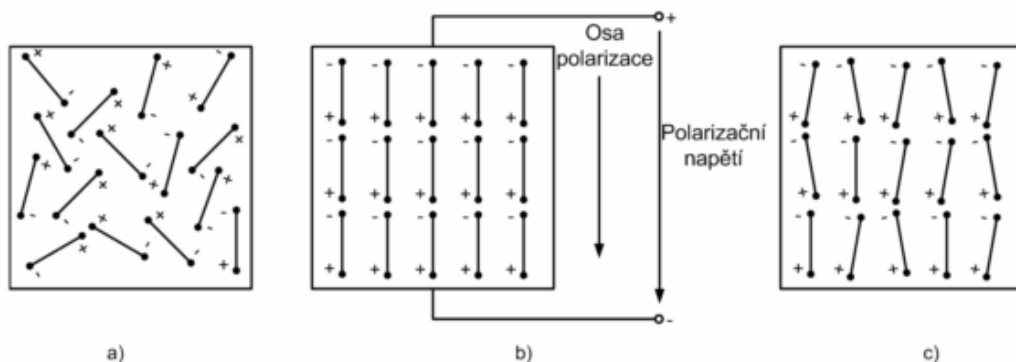
Jako objevitelé piezoelektrického jevu jsou ale považováni bratři Pierre a Jacques Curierovi, kteří roku 1880 přišli s objevem, že při stlačování krystalů turmalínu v určitých směrech (polární osy) se na koncích těchto os objevují náboje opačných znamének. Dalším zkoumáním zjistili, že se tento jev objevuje i u jiných druhů krystalů, například u krystalů křemene. Tento jev, tedy když při deformaci krystalu vznikají na jeho koncích náboje opačných znamének, se nazývá přímý piezoelektrický jev. V případě nepřímého piezoelektrického jevu se jedná o deformaci krystalu způsobenou přiloženým elektrickým polem[1].

1.1 Piezokeramika

V dnešní době se piezokeramika vyrábí pomocí materiálů na bázi tuhých roztoků oxidů olova (Pb), zirkonu (Zr) a titanu (Ti). PZT keramika není sama o sobě před polarizací piezoelektrická, i když samotná zrna piezoelektrické vlastnosti mají. Je to z důvodu nahodilého uspořádání zrn vůči sobě a je potřeba toto uspořádání srovnat do jednoho směru - polarizovat. Nutno podotknout, že polarizace jakéhokoliv dielektrika způsobuje jeho určitou deformaci [1].

Polarizace se provádí nejčastěji přiložením vnějšího elektrického pole, kdy jsou jednotlivé směry spontánních polarizací uspořádány tak, aby svíraly co nejmenší úhel se směrem polarizačního elektrického pole. Současně při polarizaci dochází také k mechanickému působení mezi zrny, což v některých případech může způsobit praskání keramiky. Využívané elektrické pole je typicky 2 až 4kV/mm a liší se podle typu používané keramiky. Pro některé typy PZT keramiky se pro polarizaci využívá také zvýšené teploty, která však nesmí přesáhnout tzv. Curierovu teplotu. Při této teplotě zanikají piezoelektrické vlastnosti, u piezokeramiky typu PCM51 je tato teplota 340°C [8] [1].

Piezokeramika se dá obecně rozdělit na dvě skupiny a to na měkkou keramiku a tvrdou. Měkká keramika, tzv. soft keramika, se používá pro různé snímače, například pro snímače zrychlení a chvění. Vyznačuje se dobrou pohyblivostí doménových stěn a může se polarizovat při nižší teplotě a slabším elektrickém poli. Naopak tvrdá keramika (hard keramika) se polarizuje při vyšších teplotách a je potřeba silnější elektrické pole, jelikož u toho typu jsou doménové stěny pevně fixovány. Tento druh piezokeramiky se používá ve výkonových aplikacích [8].



Obrázek 1.1: Uspořádání domén a) před polarizací, b) během polarizace, c) po polarizaci [15]

1.2 Rozdělení materiálů

Piezoelektrické materiály se dají rozdělit do třech skupin, první skupinou jsou krystalické piezoelektrické látky, jinak nazývané jako monokrystaly. Typickým představitelem této skupiny je například křemen, chemickým složením oxid křemičitý SiO_2 , a turmalín, který je po chemické stránce komplikovaný křemičitan.

Druhou část tvoří polykrystalické piezoelektrické látky, většinou ve formě tuhých roztoků, které se stávají piezoelektrickými pouze po polarizaci. Do této skupiny patří i často používaná PZT keramika (olovo-zirkonát titanát).

Poslední skupinu tvoří organické polymery, které jsou na materiálech jako polyvinylchlorid (PVC) nebo polyvinylfluorid (PVF). U toho typu materiálu je technologie výroby velmi složitá [1].

1.3 Využití piezoelektrického jevu

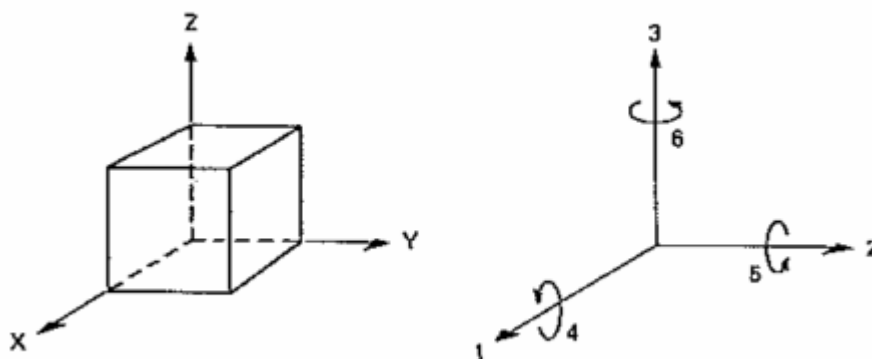
V dnešní době je použití prvků, které využívají piezoelektrického jevu a to jak přímého, tak nepřímého, velmi široké. Od spotřební elektrotechniky, strojírenství a energetiku nacházejí piezoelektrické prvky uplatnění v oblasti lékařské diagnostiky a léčbě. Piezoelektrické rezonátory se zhruba z 80% používají v oscilátorech ke stabilizaci kmitočtu ve velmi širokém kmitočtovém rozsahu (od 1kHz do 200MHz). Další využití rezonátorů je v různých filtrech a to z důvodu vysokého činitele jakosti Q piezoelektrických rezonátorů [16] [8].

1.4 Piezoelektrické konstanty

Piezoelektrické konstanty udávají vztah mezi mechanickou a elektrickou energií piezoelektrických látek a charakterizují každý piezoelektrický materiál.

U každé konstanty jsou uvedeny dva indexy, které určují směr dvou souvisejících hodnot. První index určuje směr buzení, druhým indexem je určen směr odezvy.[norma]

Na obr.X jsou uvedeny směry sil ovlivňující piezoelektrický prvek, přičemž ose Z obvykle odpovídá směr pozitivní polarizace.



Obrázek 1.2: Směry sil ovlivňující piezoelektrický prvek [3]

1.4.1 Piezoelektrická deformační konstanta h_{ij} [9]

Deformační konstanta charakterizuje přímý piezoelektrický jev a je určena vztahem:

$$h_{ij} = \frac{U_p}{\Delta l} \quad (1.1)$$

Kde:

h_{ij} ... piezoelektrická deformační konstanta [$V \cdot m^{-1}$]

U_p ... napětí naprázdno [V]

Δl ... změna velikosti [m]

1.4.2 Elektromechanický koeficient vazby k_{ij} [9]

Vyjadřuje schopnost přeměny elektrické energie na mechanickou a obráceně, využívá se jeho druhá mocnina.

Obecně se dá popsat vztahem:

$$k_{ij}^2 = d_{ij} \cdot h_{ij} \quad (1.2)$$

Kde:

k_{ij} ... elektromechanický koeficient vazby [-]

d_{ij} ... piezoelektrická nábojová konstanta [C/N nebo $m \cdot V^{-1}$]

h_{ij} ... piezoelektrická deformační konstanta [V/m]

1.4.3 Piezoelektrický nábojový koeficient d_{ij} [9]

Jedná se o v praxi důležitou konstantu, která udává jestli jde měnič použít jako vysílací prvek. Nábojový koeficient charakterizuje nejčastěji nepřímý piezoelektrický jev. Pro piezokeramiku existují tři koeficienty nezávislé jeden na druhém a to d_{33} , d_{31} a d_{15}

Koeficient udává změnu rozměrů měniče v závislosti na napětí na elektrodách a intenzitě elektrického pole.

Obecně platí:

$$d_{ij} = \frac{\Delta l}{U_v} \quad (1.3)$$

Kde:

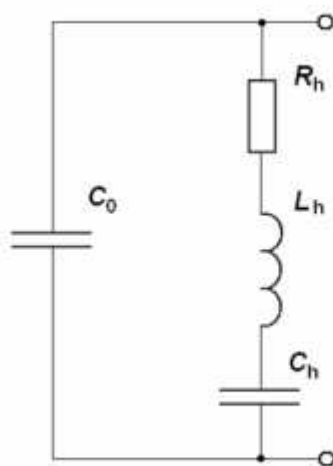
d_{ij} - piezoelektrický nábojový koeficient [C/N nebo $m \cdot V^{-1}$]

Δl - výchylka (změna vzdálenosti) [m]

U_v - napětí na elektrodách [V]

1.5 Náhradní obvod piezoelektrického rezonátoru

Náhradní schéma piezoelektrického rezonátoru představuje dvojpól, který má některé charakteristické vlastnosti. Náhradní obvod je naznačen na obr. X. Z mechanického hlediska představuje rezistor R ztráty v krystalu, cívka L hmotnost a kondenzátor C poddajnost. Velikost odporu R se mění s mechanickým zatížením a nepřímo úměrně závisí na amplitudě kmitů piezorezonátoru [17] [16].



Obrázek 1.3: Náhradní schéma piezoelektrického rezonátoru v okolí h -té rezonance [17]

Jednotlivé prvky náhradního schématu:

C_0 ... statická kapacita rezonátoru [F]

R_h ... dynamický odpor pro h -tý harmonický kmitočet [Ω]

L_h ... dynamická indukčnost pro h -tý harmonický kmitočet [H]

C_h ... dynamická kapacita pro h -tý harmonický kmitočet [F]

V praxi je potřeba znát chování piezoelektrického rezonátoru v okolí jedné h -té rezonance (h je přirozené číslo; $h=1,2,3,\dots$)

Důležitou veličinou popisující piezoelektrický rezonátor je činitel jakosti Q , který je dán vztahem [16]:

$$Q = \frac{\omega L_h}{R_h} \quad (1.4)$$

Jelikož hodnota ztrátového činitele Q je vysoká, můžeme zanedbat tlumení. Sériová a paralelní rezonanční frekvence se vypočítá dle následujících vztahů:

a) sériová rezonanční frekvence [16]

$$\omega_s = \frac{1}{\sqrt{L_h C_h}} \Rightarrow f_s = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_h C_h}} \quad (1.5)$$

b) paralelní rezonanční frekvence [16]

$$\omega_p = \sqrt{\frac{C_h + C_0}{C_h C_0 L_h}} \Rightarrow f_p = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_h \frac{C_h C_0}{C_h + C_0}}} \quad (1.6)$$

2 NEJISTOTY MĚŘENÍ

2.1 Úvod

Metodika nejistoty měření nahrazuje v oblasti vyhodnocování nepřesnosti měření starý koncept, kterým byly chyby měření. V průmyslové praxi se tento nový koncept ještě tolik neprosazuje, ale v oblasti kalibrace a vrcholové metrologie se nejistoty měření používají.

Již v osmdesátých letech přijal Mezinárodní úřad pro váhy a míry doporučení, aby se změnila koncepce chyb měření na nejistoty měření. S postupem času byly vydávány předpisy, které sjednocovaly vyjadřování nejistot.

V České Republice tyto předpisy reprezentují především Technické předpisy metrologické TPM řady 005x[12].

Při určování nejistot měření se vychází z teorie pravděpodobnosti a matematické statistiky, kde je předpoklad, že se měřené hodnoty jako i chyby řídí určitým rozdělením pravděpodobnosti. Potom i výsledek měření má určité rozdělení pravděpodobnosti[12]

2.2 Typy nejistot

Každé měření je zatíženo celou řadou chyb a to jak u přímého, tak u nepřímého měření. Pro určení nejistot měření je vždy potřeba uvažovat základní ovlivňující faktory měření, což jsou například vlivy prostředí, vhodný výběr měřicí metody a měřících přístrojů či vybavení a v neposlední řadě i zkušenost osoby, která provádí vlastní měření [7] [12].

Nejistoty měření se dělí do třech skupin:

- a) Nejistota typu A
- b) Nejistota typu B
- c) Nejistota typu C

2.2.1 Nejistota typu A

Tuto nejistotu lze získat statickým zpracováním naměřených údajů. Nejistota typu A je způsobena kolísáním naměřených údajů. Pro určení nejistoty tohoto typu je potřeba n nezávislých měření, přičemž počet těchto měření musí být vyšší než 10.

Odhad měřené veličiny je určen jako aritmetický (výběrový) průměr[12]:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.1)$$

Výsledná nejistota typu A se rovná směrodatné odchylce výběrového průměru a značí se u_a [12]:

$$u_a(x) = s_x = \frac{s_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.2)$$

2.2.2 Nejistota typu B

Standardní nejistota typu B se odhaduje pomocí všech možných dostupných informací podle racionálního úsudku, nikoliv na statické analýze pozorování. Tyto informace lze získat nejčastěji z údajů od výrobce měřicí techniky, zkušeností z předchozích měření, z poznatků a zkušeností s chováním a vlastnostmi materiálu a techniky, z údajů získaných při kalibraci a dále například z referenčních údajů v příručkách. [11] [12].

Univerzální využití těchto informací a postup pro výpočet nejistot typu B neexistuje a závisí to pouze na zkušenostech a praxi osoby, která měření prováděla.

Existuje rámcový postup při určování nejistot typu B [12]:

1. Vytipují se možné zdroje nejistot
2. U každého zdroje nejistoty se určí standardní nejistota a to buď převzetím z certifikátu, technické dokumentace, technických norem či kalibračních listů apod.
3. Posoudí se korelace mezi jednotlivými zdroji nejistot
4. Určí se vztah mezi měřenou veličinou a jednotlivými zdroji nejistot
5. Vypočítá se standardní nejistota typu B podle vztahu (cislo) s použitím zákona šíření nejistot.

$$u_b(x) = \sqrt{\sum_{j=1}^p A_j^2 u_{Bzj}(x)} \quad (2.3)$$

Kde:

$u_b(x)$... standardní nejistota typu B

p ... počet zdrojů nejistot

A_j ... koeficient citlivosti

$u_{Bzj}(x)$... nejistoty jednotlivých zdrojů

2.2.3 Nejistota typu C

V praxi nám většinou nestačí pouze jeden typ nejistoty, z tohoto důvodu je zavedena tzv. kombinovaná nejistota, která zachycuje působení obou typů nejistot.

Výsledná nejistota typu C se vypočítá jako odmocnina ze součtu čtverců standardních nejistot typu A a B [12]:

$$u_c(x) = \sqrt{u_a^2(x) + u_b^2(x)} \quad (2.4)$$

2.2.4 Rozšířená nejistota

V praxi existují případy, kdy nám vyjádření kombinované nejistoty u_c nestačí. Je to způsobeno pokrytím intervalu měřených hodnot standardní nejistotou, při normálním rozdělení pravděpodobnosti je pokryto pouze 68% intervalu. Pro pokrytí většího procenta intervalu je třeba standardní nejistotu rozšířit koeficientem k_r , jehož význam je v podstatě stejný jako význam kvantilů u normálního Gausova rozdělení. Při hodnotě $k_r=2$ je pokryto 95% intervalu a při $k_r=3$ je to 99,7%. [12]

Rozšířená nejistota je pak vyjádřena vztahem:

$$U = k_r \cdot u \quad (2.5)$$

Kde:

U ... rozšířená nejistota

k_r ... koeficient rozšíření

u ... standardní nejistota

Koeficient rozšíření k_r	Pravděpodobnost P
1	68,00%
2	95,00%
2,58	99,00%
3	99,70%

Obrázek 2.1: Tabulka koeficientů rozšíření

3 FREKVENČNÍ METODA

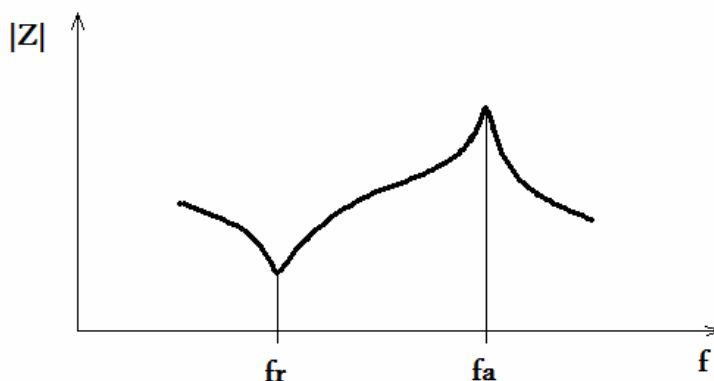
U této metody se ve frekvenčním pásmu hledá rezonanční a antirezonanční frekvence a spolu s dalšími parametry vzorku jako jsou jeho rozměry a kapacita se výpočtem dojde k hodnotě piezoelektrického nábojového koeficientu. Rezonanční frekvence je taková frekvence, při níž je naměřena nejmenší impedance, při naměření maximální hodnoty impedance se jedná o antirezonanční frekvenci. V celém kmitočtovém pásmu je velké množství těchto impedance minim a maxim, což může být dáno skladbou materiálu, geometrickým tvarem měniče a teplotním namáháním. Nás zajímají první dva významné extrémy.

Hledané frekvence lze zjistit různými metodami. První metodou je použití RLC metru, kdy se měří impedance vzorku. Frekvence, při které byla naměřena nejnižší impedance odpovídá rezonančnímu kmitočtu a následující frekvence, kdy je impedance nejvyšší, je frekvencí antirezonanční. Vzorek je v průběhu měření umístěn v měřících kleštích, které musí být před začátkem měření kalibrovány.

Tyto dvě frekvence lze zjistit i v případě, když není k dispozici RLC metr a to s použitím generátoru a voltmetru. Při této metodě se spojitě mění frekvence generátoru v předpokládané frekvenční oblasti a sleduje se výchylka na milivoltmetru. Podle volby měřícího zapojení (sériové, paralelní) odpovídá minimální napětí rezonanční frekvenci a maximální napětí antirezonančnímu kmitočtu a naopak.[10].

Dalším způsob jak zjistit rezonanční a antirezonanční frekvence vzorku je použití spektrálního analyzátoru, kde se nám přímo zobrazí frekvenční charakteristika vzorku v námi zvoleném rozsahu. Rezonanční a antirezonanční frekvence lze jednoduše odečíst pomocí funkcí spektrálního analyzátoru.

Na obr.3.1 je zobrazena ideální frekvenční charakteristika piezoelektrického měniče, jsou zde jasně vidět obě hledané frekvence.



Obrázek 3.1: Ideální frekvenční průběh měniče

4 PŘÍMÁ METODA

Určení piezoelektrické nábojové konstanty lze provést i jinými způsoby, než zjišťováním frekvenční charakteristiky a odečítáním rezonančních kmitočtů. Navíc při měření přímou metodou odpadají složité výpočty, jako tomu bylo u metody frekvenční.

Měření přímou metodou spočívá v odečítání výchylky měřeného vzorku, který se po přivedení napájecího napětí roztáhne o určitou vzdálenost (nm), využívá se tedy nepřímého piezoelektrického jevu.

Snímání délky roztážení vzorku lze realizovat různými délkoměry, které fungují na principu přímého dotyku, tedy že hrot snímače se přímo dotýká měřeného vzorku. Dalším způsobem je využití bezdotykového měření. V tomto případě lze využít laserového interferometru, který splňuje velké nároky na přesnost, jelikož se zde měří velmi malé vzdálenosti.

Laserový interferometr funguje na principu Dopplerova jevu, který popisuje změnu frekvence a vlnové délky přijímaného oproti vysílanému signálu, která je způsobena nenulovou vzájemnou rychlostí vysílače a přijímače.

Pro případ, že vzájemná rychlost vysílače a přijímače je menší než rychlost světla, platí [17]:

$$f = f_0 \cdot \left(1 \pm \frac{v}{c}\right) \quad (4.1)$$

Kde:

f_0 ... frekvence je-li vysílač a přijímač v klidu [Hz]

v ... vzájemná rychlost vysílače a přijímače [$m \cdot s^{-1}$]

c ... rychlost světla [$m \cdot s^{-1}$]

Pro přibližující se přijímač je vzájemná rychlost kladná, pro vzdalující se je pak záporná.

5 KVAZISTATICKÁ METODA

Oproti přímé metodě se u kvazistatické metody využívá přímého piezoelektrického jevu. Vyvoláním síly působící na plochu vzorku se na koncích měniče objeví měřitelné napětí. Deformační sílu lze způsobit závažím o definované hmotnosti nebo například tlakem prstu, ale tento způsob není vhodný pokud chceme zjistit hodnotu piezoelektrického nábojového koeficientu, jelikož při výpočtu je potřeba znát velikost působící síly a ta se vypočítá z hmotnosti působícího tělesa.

Při položení závaží na piezoelektrický vzorek dojde ke skokové změně napětí, která je způsobena nabitím a následným vybitím náboje. Stejná skoková změna napětí nastane i při odejmutí závaží z měřeného měniče.

Na obr.4.1 je uvedeno principiální schéma pro měření napětí odpovídajícímu přiložené síle.



Obrázek 4.1: Schéma zapojení pro měření kvazistatickou metodou

6 PRAKTICKÁ MĚŘENÍ

Pro praktická měření uskutečněná v laboratorních podmínkách byly použity piezokeramické vzorky z šarže PCM41 a PCM51 ve tvaru válečku. Rozměry těchto válečků odpovídají jak evropské normě ČSN EN 50324-1:2002 [3], tak i světové normě CEI/IEC 60483:1976 [18]. Seznam měřených vzorků je uveden v následující tabulce:

Tabulka 4.1: Tabulka měřených vzorků

Vzorek č.	d [mm]	h [mm]	C [pF]	typ
1	3,507	20,108	7,62	PCM 51
2	6,967	14,539	41,42	PCM 51
3	8,842	18,357	33,74	PCM 41

6.1 Měření frekvenční metodou

Měření bylo prováděno na vzorcích uvedených v Tabulce 4.1 a to třemi různými způsoby pro frekvenční metodu. První použitou metodou bylo použití RLC metru HIOKI, další metodou bylo využití generátoru a voltmetru a nakonec se měřené vzorky změřily na impedančním analyzátoru.

6.1.1 Měření pomocí RLC metru

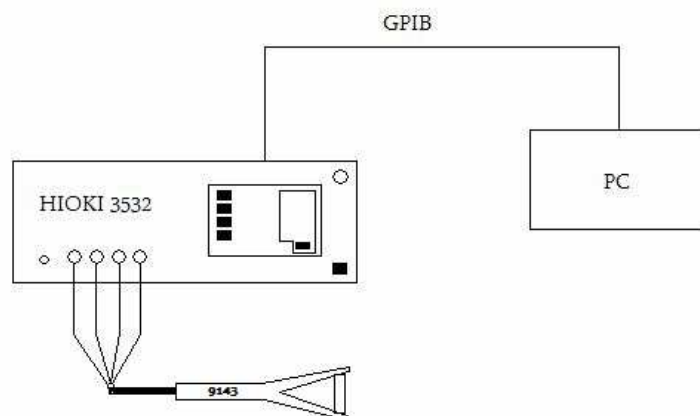
K tomuto měření byl použit přístroj HIOKI 3532, kterým je možné měřit v rozsahu 42Hz až 5MHz. RLC metr byl připojen k počítači pomocí sběrnice GPIB a samotné měření bylo prováděno pomocí programu LabView, kde bylo potřeba nastavit rozsah frekvencí, krok s kterým se bude postupovat, napětí (zvolené 1V) a rychlost měření. Využití programu LabView bylo z toho důvodu, abychom mohli zobrazit celkovou frekvenční závislost vzorku. Dále již bylo s nižším krokem proměřováno okolí rezonančních kmitočtů.

Měřený vzorek byl umístěn v měřící pinzetě Pincher Probe 9143, která má rozpětí svorek 0 až 6mm a může pracovat až do frekvence 5MHz. Pro lepší kontakt svorek pinzety a elektrod měřeného vzorku byla přes pinzetu namotána gumička.

Před začátkem měření bylo potřeba zkalibrovat měřící pinzetu, což se mohlo provést pomocí programu LabView nebo přímo na přístroji HIOKI 3532. Pomocí RLC metru byla změřena i impedance měřených vzorků na frekvenci 1 kHz.

Měřené vzorky se nejprve proměřili v celém frekvenčním rozsahu (42Hz až 5MHz), určili se oblasti rezonančního a antirezonančního kmitočtu a poté se měření opakovalo jen v určeném intervalu frekvencí, kde se tyto kmitočty nacházeli. Toto se provádělo z důvodu přesnějšího určení těchto kmitočtů.

6.1.1.1 Schéma zapojení



Obr 4.2: Schéma zapojení pro měření pomocí RLC metru HIOKI

Tabulka 4.2: Tabulka použitých přístrojů u frekvenční metody s použitím RLC metru

RLC metr	HIOKI 3532
Měřící pinzeta	Pincher Probe 9143
PC	OS Windows XP

Tabulka 4.3: Technické parametry RLC metru HIOKI 3532 [6]

Měřené parametry	$ Z , Y , \theta, R_p, R_s(\text{ESR}), G, X, B, C_p, C_s, L_p, L_s, D(\tan \delta), Q$
Rozsah pro měření $ Z $	10m Ω až 200M Ω
Rozsah pro měření θ	-180° až 180°
Rozsah pro měření C	0,32pF až 370mF
Rozsah pro měření L	16nH až 750kH
Rozsah pro měření D	0,00001 až 9,99999
Rozsah pro měření Q	0,01 až 999,99
Rozsah pro měření $ Y $	5nS až 99,999S
Frekvenční rozsah	42Hz až 5MHz
Rychlosti měření	FAST(5ms), NORMAL(21ms), SLOW 1(72ms), SLOW 2(140ms)
Výstupní impedance	50 Ω

6.1.1.2 Výpočet piezoelektrického nábojového koeficientu [4]

Pro tloušťkové podélné kmity se nábojový koeficient d_{33} určí podle vztahu :

$$d_{33} = k_{33} \cdot (e_{33}^T \cdot s_{33}^E)^{\frac{1}{2}} \quad (6.1)$$

Bylo tedy potřeba vypočítat konstanty k_{33} , e_{33}^T a s_{33}^E :

$$k_{33} = \left[\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_a}{f_p} \cdot \tan \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_a - f_p}{f_a} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6.2)$$

$$s_{33}^D = \frac{1}{4 \cdot \rho \cdot f_p^2 \cdot h^2} \Rightarrow s_{33}^E = \frac{s_{33}^D}{1 - k_{33}^2} \quad (6.3)$$

$$e_{33}^T = \epsilon_{3r} \cdot \epsilon_0 = C^T \cdot \frac{h}{A} = C^T \cdot \frac{h}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}} \quad (6.4)$$

6.1.1.3 Dosazení do daných vztahů

Dosazení bylo prováděno pro vzorek č.1 z tabulky měřených vzorků (Tabulka 4.1) :

Naměřené hodnoty rezonanční a antirezonanční frekvence jsou $f_r=69\text{kHz}$,
 $f_a=95\text{kHz}$.

$$k_{33} = \left[\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_r}{f_a} \cdot \tan\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_a - f_r}{f_a}\right) \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{\pi}{2} \cdot \frac{69000}{95000} \cdot \tan\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{95000 - 65000}{95000}\right) \right]^{\frac{1}{2}} = 0,72$$

$$s_{33}^D = \frac{1}{4 \cdot \rho \cdot f_a^2 \cdot h^2} = \frac{1}{4 \cdot 7,7 \cdot 10^3 \cdot 95000^2 \cdot (20,108 \cdot 10^{-3})^2} = 8,90 \cdot 10^{-12} m^2 \cdot N^{-1}$$

$$s_{33}^E = \frac{s_{33}^D}{1 - k_{33}^2} = \frac{8,90 \cdot 10^{-12}}{1 - 0,72} = 18,70 \cdot 10^{-12} m^2 \cdot N^{-1}$$

$$e_{33}^T = \varepsilon_{3r} \cdot \varepsilon_0 = C^T \cdot \frac{h}{A} = C^T \cdot \frac{h}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}} = 7,62 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{20,108 \cdot 10^{-3}}{\frac{\pi \cdot (3,507 \cdot 10^{-3})^2}{4}} = 1,590 \cdot 10^{-8} F \cdot m^{-1}$$

$$d_{33} = k_{33} \cdot (e_{33}^T \cdot s_{33}^E)^{\frac{1}{2}} = 0,72 \cdot (1,59 \cdot 10^{-8} \cdot 18,70 \cdot 10^{-12})^{\frac{1}{2}} = 393 \cdot 10^{-12} C \cdot N^{-1}$$

6.1.1.4 Dosažené výsledky

Pro každý měřený vzorek byly vypočítány následující piezoelektrické konstanty a to pro každé z deseti měření na každém vzorku. V Tabulce 4.4 je pak zobrazen jejich aritmetický průměr.

Tabulka 4.4: Vypočtené koeficienty měřených vzorků

č.	$k_{33} [-]$	$s_{33}^d [m^2 \cdot N^{-1}]$	$s_{33}^e [m^2 \cdot N^{-1}]$	$e_{33} [F \cdot m^{-1}]$	$d_{33} [C \cdot N^{-1}]$
1	0,72	$8,90 \cdot 10^{-12}$	$18,70 \cdot 10^{-12}$	$1,59 \cdot 10^{-8}$	$393 \cdot 10^{-12}$
2	0,72	$9,22 \cdot 10^{-12}$	$19,30 \cdot 10^{-12}$	$1,58 \cdot 10^{-8}$	$399 \cdot 10^{-12}$
3	0,62	$7,18 \cdot 10^{-12}$	$11,80 \cdot 10^{-12}$	$1,01 \cdot 10^{-8}$	$215 \cdot 10^{-12}$

6.1.1.5 Nejistoty měření

Ukázkové příklady výpočtu nejistot jsou uvedeny pro vzorek č.2 z tabulky měřených prvků, přehled celkových nejistot metody je uveden na konci této kapitoly.

a) Nejistota typu A:

Na RLC metru byla měřena maximální a minimální impedance a odečítány frekvence, dále byla změřena při 1kHz kapacita vzorku.

Aritmetický průměr se určí podle vztahu (2.1) :

$$\bar{Z}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_1 = \frac{463400}{10} = 46340 \Omega$$

$$\bar{Z}_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_2 = \frac{29180000}{10} = 2918000 \Omega$$

$$\bar{C} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C = \frac{76,21 \cdot 10^{-12}}{10} = 7,62 pF$$

Mírou nejistoty jednotlivého měření je výběrová směrodatná odchylka, jejíž odhad získáme jako:

$$s(Z_1) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Z_1 - \bar{Z}_1)^2} = \sqrt{\frac{1}{9} \cdot 8400} = 30,55 \Omega$$

$$s(Z_2) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Z_2 - \bar{Z}_2)^2} = \sqrt{\frac{1}{9} \cdot 96000000} = 3265,99 \Omega$$

$$s(C) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (C - \bar{C})^2} = \sqrt{\frac{1}{9} \cdot 0,000049 \cdot 10^{-12}} = 0,0023 pF$$

Standardní nejistotu typu A získáme z rovnice (2.2) :

$$u_a(Z_1) = \frac{s(Z_1)}{\sqrt{n}} = \frac{30,55}{\sqrt{10}} = 9,66\Omega$$

$$u_a(Z_2) = \frac{s(Z_2)}{\sqrt{n}} = \frac{3265,99}{\sqrt{10}} = 1032,80\Omega$$

$$u_a(C) = \frac{s(C)}{\sqrt{n}} = \frac{0,0023 \cdot 10^{-12}}{\sqrt{10}} = 0,00074 pF$$

Tabulka 4.5: Tabulka pro výpočet aritmetického průměru a nejistoty typu A pro vzorek č.2

č.měření	Z_i [Ω]	$(Z_i - \bar{Z}_i)$ [Ω]	$(Z_i - \bar{Z}_i)^2$ [Ω]
1	4,64E+04	60	3600
2	4,64E+04	60	3600
3	4,62E+04	-140	19600
4	4,63E+04	-40	1600
5	4,64E+04	60	3600
6	4,62E+04	-140	19600
7	4,63E+04	-40	1600
8	4,65E+04	160	25600
9	4,63E+04	-40	1600
10	4,64E+04	60	3600
Σ	46340		8400

b) Nejistota typu B:

Zdrojem nejistoty může být nedokonalý kontakt elektrod měniče a měřící pinzety, což bylo eliminováno obmotáním konce pinzety stahovací gumičkou.

Nejlepší přesnost je udávána jako $\pm 0,08\%$ měřené veličiny.

$$u_b(Z_1) = \pm 0,08\% \cdot 46340 = 37,07\Omega$$

$$u_b(Z_2) = \pm 0,08\% \cdot 2918000 = 2334,40\Omega$$

$$u_b(C) = \pm 0,08\% \cdot 7,621 \cdot 10^{-12} = 0,0061 pF$$

c) Nejistota typu C:

Kombinovaná nejistota se určí podle vztahu (2.4) :

$$u_c(Z_1) = \sqrt{u_a^2(Z_1) + u_b^2(Z_1)} = \sqrt{9,66^2 + 37,07^2} = 38,31\Omega$$

$$u_c(Z_2) = \sqrt{u_a^2(Z_2) + u_b^2(Z_2)} = \sqrt{1032,80^2 + 2334,40^2} = 2552,67\Omega$$

$$u_c(C) = \sqrt{u_a^2(C) + u_b^2(C)} = \sqrt{(0,00074 \cdot 10^{-12})^2 + (0,0061 \cdot 10^{-12})^2} = 0,0061 pF$$

Pro větší spolehlivost určení nejistoty se standardní nejistota nahradí rozšířenou nejistotou podle rovnice (2.5) pro koeficient rozšíření $k_r=2$.

$$U(Z_1) = k_r \cdot u_c(Z_1) = 2 \cdot 38,31 = 76,62\Omega$$

$$U(Z_2) = k_r \cdot u_c(Z_2) = 2 \cdot 2552,67 = 5105,34\Omega$$

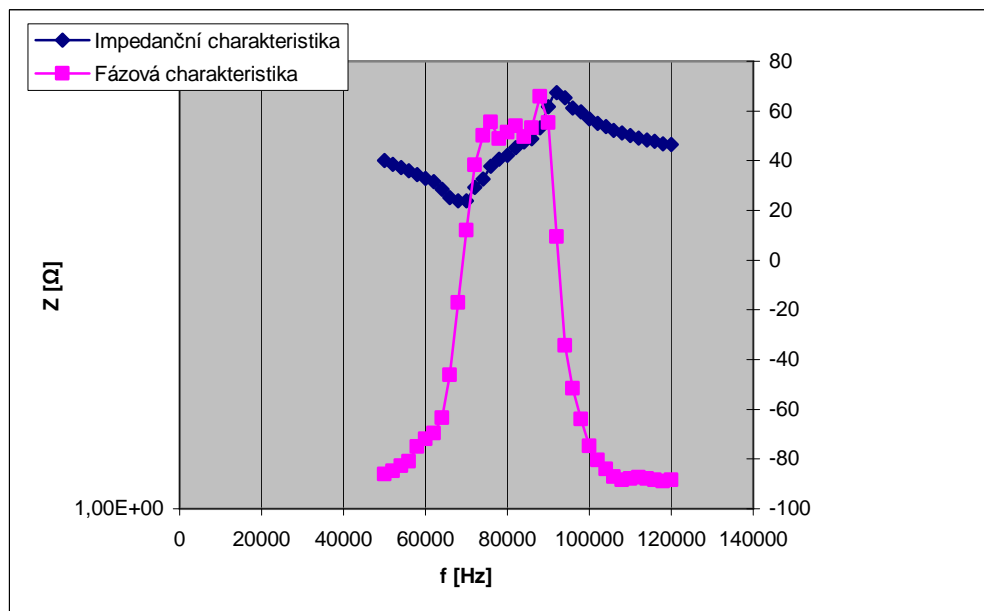
$$U(C) = k_r \cdot u_c(C) = 2 \cdot (0,0061 \cdot 10^{-12}) = 0,0122 pF$$

Tabulka 4.6: Přehled vypočítaných nejistot při měření s RLC metrem HIOKI

vzorek č.	1	2	3
$u_a(Z_1) [\Omega]$	9,66	9,40	2,17
$u_a(Z_2) [\Omega]$	1032,80	12631,97	4055,18
$u_a(C) [pF]$	0,00074	0,00079	0,00127
$u_b(Z_1) [\Omega]$	37,07	2,99	1,28
$u_b(Z_2) [\Omega]$	2334,40	978,4	1080
$u_b(C) [pF]$	0,0061	0,0331	0,0269
$u_c(Z_1) [\Omega]$	38,31	9,86	2,52
$u_c(Z_2) [\Omega]$	2552,67	12668,84	4196,53
$u_c(C) [pF]$	0,0061	0,0331	0,0269
$U(Z_1) [\Omega]$	76,62	19,72	5,04
$U(Z_2) [\Omega]$	5105,34	25337,68	8393,06
$U(C) [pF]$	0,0122	0,0662	0,0538

6.1.1.6 Charakteristiky

Na obrázku 4.3 je zobrazena naměřená impedanční a fázová charakteristika vzorku č.1 z tabulky měřených vzorků (Tabulka 4.1).



Obrázek 4.3: Impedanční a fázová charakteristika vzorku č.1

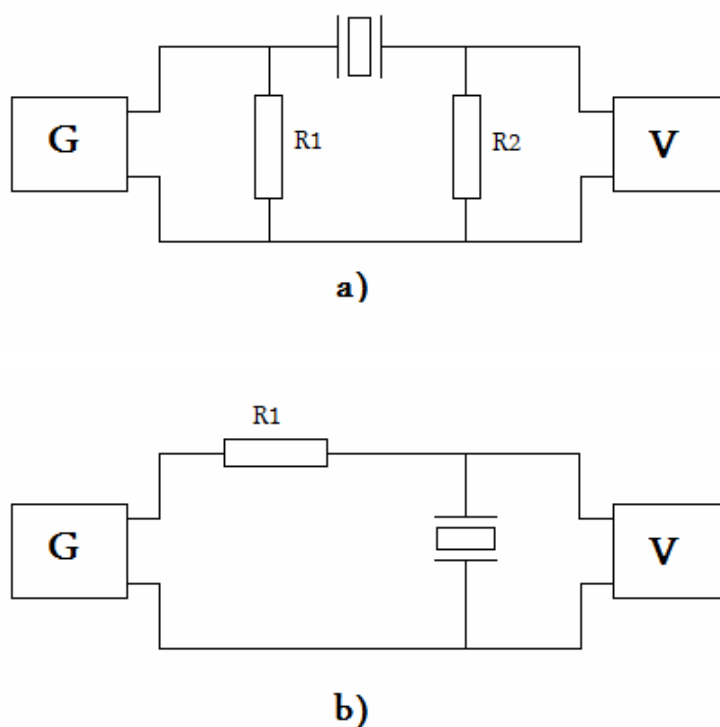
6.1.2 Měření s generátorem a voltmetrem

Jak již bylo zmíněno, hledané rezonanční a antirezonanční frekvence lze zjistit i v případě pokud bychom neměli k dispozici RLC metr či spektrální analyzátor, jimiž se tyto frekvence snadno určí. Jednou z možných metod, která byla odzkoušena a změřena v laboratorních podmínkách je metoda s použitím generátoru a milivoltmetru, pomocí něhož se měří výchylka napětí. Podle způsobu zapojení odpovídá maximální hodnota napětí buď rezonanční nebo antirezonanční a minimální hodnota napětí antirezonanční či rezonanční frekvenci.

Pokud se použije zapojení podle obr. 4.4a), je hodnota napětí při rezonanční frekvenci maximální a při antirezonanční frekvenci minimální. Při zapojení podle obr. 4.4b), je to naopak, tedy rezonanční frekvence odpovídá minimální výchylce napětí a antirezonanční frekvence maximálnímu napětí. Nevýhodou této metody je, že nám nepodává komplexní záznam o frekvenční závislosti měniče, ale pouze zjišťujeme určité body frekvenční charakteristiky [10].

Tato metoda je poměrně přesná, jelikož umožňuje přesné ruční nastavení frekvence generátoru a zjistit přesná maxima a minima napětí. Měření bylo prováděno v obou směrech, tedy při zvyšování frekvence i při jejím snižování. Oběma způsoby bylo docíleno stejných výsledků. Stejně tak při volbě obou způsobů zapojení, jak sériového, tak paralelního, bylo dosaženo stejných výsledků u měřených vzorků.

6.1.2.1 Schéma zapojení



Obrázek 4.4: Schéma zapojení pro měření frekvenční metodou s generátorem a voltmetrem

Použité přístroje:

Tabulka 4.7: Seznam použitých přístrojů při měření s generátorem a voltmetrem

Generátor	Agilent 33220A
Multimetr	Agilent 34410A
Odporová dekáda	

6.1.2.2 Výpočet piezoelektrického nábojového koeficientu

Jestliže známe hodnoty rezonanční a antirezonanční frekvence, tak společně s rozměry vzorku znalosti jeho vlastností, můžeme vypočítat piezoelektrickou nábojovou konstantu stejným způsobem jako v případě měření s RLC metrem.

6.1.2.3 Dosažené výsledky

Jako u předchozí metody byly pro každý měřený vzorek vypočítány následující piezoelektrické konstanty a to pro každé z deseti měření na každém vzorku. V Tabulce 4.8 je pak zobrazen jejich aritmetický průměr.

Tabulka 4.8: Vypočtené koeficienty měřených vzorků

č.	$k_{33} [-]$	$s_{33}^d [m^2 \cdot N^{-1}]$	$s_{33}^e [m^2 \cdot N^{-1}]$	$e_{33} [F \cdot m^{-1}]$	$d_{33} [C \cdot N^{-1}]$
1	0,71	$8,61 \cdot 10^{-12}$	$17,20 \cdot 10^{-12}$	$1,59 \cdot 10^{-8}$	$369 \cdot 10^{-12}$
2	0,72	$9,33 \cdot 10^{-12}$	$18,60 \cdot 10^{-12}$	$1,58 \cdot 10^{-8}$	$382 \cdot 10^{-12}$
3	0,62	$8,37 \cdot 10^{-12}$	$13,30 \cdot 10^{-12}$	$1,01 \cdot 10^{-8}$	$224 \cdot 10^{-12}$

6.1.2.4 Nejistoty měření

Ukázkové příklady výpočtu nejistot jsou uvedeny pro vzorek č.1 z tabulky měřených prvků, přehled celkových nejistot metody je uveden na konci této kapitoly. Nejprve se vypočítají nejistoty typu A pro měření napětí při rezonanční a antirezonanční frekvenci, k těmto se vypočítají nejistoty typu B a nakonec se dojde k hodnotě nejistoty typu C, která se poté rozšíří na pravděpodobnost 95%.

a) Nejistota typu A:

Aritmetický průměr se určí z rovnice (2.1) :

$$\bar{U}_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{r_i} = \frac{668,1}{10} = 66,81 mV$$

$$\bar{U}_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{a_i} = \frac{702,7}{10} = 70,27 mV$$

Mírou nejistoty jednotlivého měření je výběrová směrodatná odchylka, jejíž odhad získáme dle vztahu:

$$s(U_r) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (U_r - \bar{U}_r)^2} = \sqrt{\frac{1}{9} \cdot 0,0065} = 0,0268 \text{ mV}$$

$$s(U_a) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (U_a - \bar{U}_a)^2} = \sqrt{\frac{1}{9} \cdot 0,00006} = 0,0025 \text{ mV}$$

Standardní nejistotu typu A získáme ze vztahu (2.2) :

$$u_a(U_r) = \frac{s(U_r)}{\sqrt{n}} = \frac{0,0268}{\sqrt{10}} = 0,0085 \text{ mV}$$

$$u_a(U_a) = \frac{s(U_a)}{\sqrt{n}} = \frac{0,0025}{\sqrt{10}} = 0,0008 \text{ mV}$$

Tabulka 4.9: Tabulka pro výpočet aritmetického průměru a nejistoty typu A pro vzorek č.1

Měření č.	U_r [mV]	$(U_r - \bar{U}_r)$ [mV]	$(U_r - \bar{U}_r)^2$ [mV]
1	66,64	-0,173	0,029929
2	66,72	-0,093	0,008649
3	66,79	-0,023	0,000529
4	66,81	-0,003	9E-06
5	66,81	-0,003	9E-06
6	66,8	-0,013	0,000169
7	66,88	0,067	0,004489
8	66,91	0,097	0,009409
9	66,91	0,097	0,009409
10	66,86	0,047	0,002209
Σ	66,813		0,006481

b) Nejistota typu B:

Podle přístrojového listu multimetru Agilent 34410A se chyba přístroje určí jako $\pm (\% \text{ of reading} + \% \text{ of range})$ [13]

Pro rozsah 100mV a aritmetický průměr hodnot $U_r=66,81\text{mV}$ se nejistota typu B vypočítá:

$$u_b(U_r) = \pm(0,003\% \cdot 66,81 \cdot 10^{-3} + 0,003\% \cdot 100 \cdot 10^{-3}) = 0,0050\text{mV}$$

$$u_b(U_a) = \pm(0,003\% \cdot 70,27 \cdot 10^{-3} + 0,003\% \cdot 100 \cdot 10^{-3}) = 0,0051\text{mV}$$

c) Nejistota typu C:

Kombinovaná nejistota se určí z rovnice (2.4) :

$$u_c(U_r) = \sqrt{u_a^2(U_r) + u_b^2(U_r)} = \sqrt{0,0085^2 + 0,0050^2} = 0,0099\text{mV}$$

$$u_c(U_a) = \sqrt{u_a^2(U_a) + u_b^2(U_a)} = \sqrt{0,0008^2 + 0,0051^2} = 0,0056\text{mV}$$

Pro větší spolehlivost určení nejistoty se standardní nejistota nahradí rozšířenou nejistotou podle rovnice (2.5) pro koeficient rozšíření $k_r=2$.

$$U(U_r) = k_r \cdot u_c(U_r) = 2 \cdot 0,0099 = 0,0198\text{mV}$$

$$U(U_a) = k_r \cdot u_c(U_a) = 2 \cdot 0,0056 = 0,0112\text{mV}$$

d) Souhrn všech nejistot:

V následující tabulce je uveden souhrn všech vypočítaných nejistot pro všechny měřené vzorky dle tabulky 4.1.

Tabulka 4.10: Přehled vypočítaných nejistot při měření s generátorem a voltmetrem

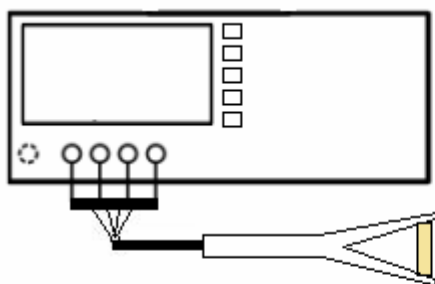
vzorek č.	1	2	3
$u_a(U_r)$ [mV]	0,0085	0,0073	0,0151
$u_a(U_a)$ [mV]	0,0008	0,0003	0,0004
$u_b(U_r)$ [mV]	0,0050	0,0050	0,0050
$u_b(U_a)$ [mV]	0,0051	0,0051	0,0056
$u_c(U_r)$ [mV]	0,0099	0,0089	0,0160
$u_c(U_a)$ [mV]	0,0056	0,0051	0,0056
$U(U_r)$ [mV]	0,0198	0,0178	0,0320
$U(U_a)$ [mV]	0,0112	0,0102	0,0112

Hlavním zdrojem nejistot při měření touto metodou bylo nedokonalé uchycení vzorku. Kontakt mezi elektrodami vzorku a elektrodami pro přivedení signálu byl špatný a to se projevilo ve výsledné chybě metody, spolu s chybou způsobenou dlouhými vodiči.

6.1.3 Použití impedančního analyzátoru

K měření byl použit impedanční analyzátor Agilent E4294E. Měření pomocí impedančního analyzátoru je mnohem rychlejší a jednodušší nežli obě předchozí metody, jelikož se naměřená impedanční charakteristika zobrazí přímo na displeji přístroje a pomocí funkcí analyzátoru MIN a MAX se jednoduše odečtou minima a maxima impedanční charakteristiky. Pro přesnější určení těchto extrémů, se zobrazuje pouze určité frekvenční rozmezí, ve kterém leží jak rezonanční, tak antirezonanční frekvence. Toto nastavení se provádí pomocí tlačítek START a STOP.

6.1.3.1 Schéma zapojení



Obrázek 4.5: Schéma zapojení pro měření s impedančním analyzátozem

6.1.3.2 Výpočet piezoelektrického nábojového koeficientu

Obdobným způsobem jako u obou předchozích metod se výpočtem dojde k hodnotě piezoelektrického nábojového koeficientu.

6.1.3.3 Dosažené výsledky

Měřené vzorky byly proměřeny ve frekvenčním rozmezí od 15kHz pod antirezonanční frekvencí do 15kHz nad rezonanční frekvenci toho daného vzorku. Použitím funkcí analyzátoru MIN a MAX se jednoduše přečetly hodnoty těchto dvou frekvencí, které jsou zapsány v tabulce 4.12.

Tabulka 4.11: Naměřené hodnoty antirezonanční a rezonanční frekvence impedančním analyzátozem

vzorek č.	f_p [kHz]	f_a [kHz]
1	71,03	91,85
2	95,1	128,55
3	87,9	109,49

V následující tabulce je přehled vypočtených piezoelektrických koeficientů pro všechny měřené vzorky.

Tabulka 4.12: Vypočtené koeficienty měřených vzorků

č.	k_{33} [-]	$s_{33}^d [m^2 \cdot N^{-1}]$	$s_{33}^e [m^2 \cdot N^{-1}]$	$e_{33} [F \cdot m^{-1}]$	$d_{33} [C \cdot N^{-1}]$
1	0,67	$9,52 \cdot 10^{-12}$	$17,40 \cdot 10^{-12}$	$1,59 \cdot 10^{-8}$	$353 \cdot 10^{-12}$
2	0,71	$9,29 \cdot 10^{-12}$	$18,70 \cdot 10^{-12}$	$1,58 \cdot 10^{-8}$	$386 \cdot 10^{-12}$
3	0,64	$7,88 \cdot 10^{-12}$	$13,20 \cdot 10^{-12}$	$1,01 \cdot 10^{-8}$	$232 \cdot 10^{-12}$

6.1.3.4 Nejistoty měření

Počet měření s použitím spektrálního měření byl velmi malý, proto u této metody nejsou počítány nejistoty měření. Další důvodem je to, že rušivé vlivy působící na výslednou naměřenou hodnotu jsou zanedbatelné.

6.2 Měření přímou metodou

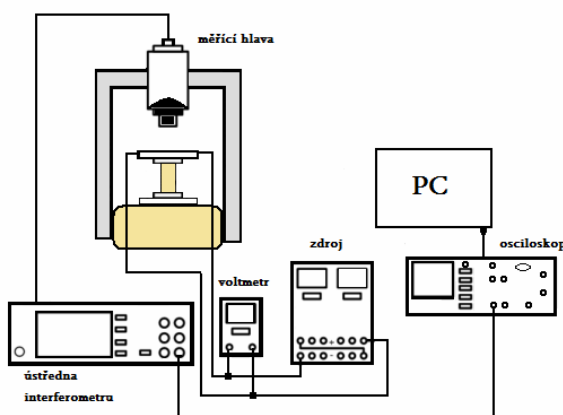
Ze stabilizovaného zdroje Tesla BS275 bylo přiváděno napětí 1000V na dva cuprexitové plátky, na kterých byl pomocí speciálního tavného lepidla přidělán měřený vzorek, avšak nesměla být překročena Curieho teplota vzorku, což se při teplotě lepidla 150°C nestalo. Vrchní plátek byl ještě zatížen skleněnou deskou, na které byl nalepen odrazný štítek, ten sloužil pro zlepšení kvality odraženého signálu.

Měřený vzorek byl umístěn na ocelovém válci, který sloužil k odrušení od okolních vibrací, které se ale na výsledném signálu objevovali při každém pohybu v místnosti, jak možné vidět na obr.4.8. Ocelový válec měl hmotnost cca 2500kg, průměr 94,0cm a výšku 43,8cm.

Před každým měřením musel být kalibrován paprsek interferometru, poté se provádělo vlastní měření, kdy se nejprve připojilo napětí 1000V a poté odpojilo a svorky byly zkratovány, to mělo za důsledek skok napětí okolo 8V jak je vidět v grafu na obrázku 4.7. Rozsah interferometru byl nastaven pro všechna měření na 50nm/V.

Vyhodnocení naměřených dat bylo provedeno připojením osciloskopu k počítači přes USB kabel. Programem DSO3000 od fy Agilent se poté mohl osciloskop ovládat dálkově a příchozí data byla zpracována rovnou v programu nebo exportována do jiného programu, například do programu Excel.

6.2.1.1 Schéma zapojení



Obrázek 4.6. Měřicí stanoviště pro měření pomocí interferometru

Použité přístroje:

Tabulka 4.13: Tabulka použitých přístrojů při měření přímou metodou

Stabilizovaný zdroj	Tesla BS275 , 0 až 1000V
Osciloskop	Agilent DSO3062A
Voltmetr	DU20, 300mV až 1000V
Ústředna interferometru	OFV-5000
Měřicí hlava interferometru	OFV-505

6.2.1.2 Výpočet piezoelektrického nábojového koeficientu

Piezoelektrický nábojový koeficient se vypočítá podle vztahu [9]:

$$\Delta l = d_{33} \cdot U \Rightarrow d_{33} = \frac{\Delta l}{U} = \frac{k \cdot \Delta U}{U} \quad (6.5)$$

Kde

Δl ... změna délky vzorku při připojení napětí [nm]

U ... napětí [V]

d_{33} ... piezoelektrická nábojová konstanta [$C \cdot N^{-1}$]

k ... rozsah interferometru [nm/V]

ΔU ... změna napětí [V]

6.2.1.3 Dosazení do daného vztahu

Dosazení bylo provedeno pro vzorek č.3 z tabulky měřených vzorků (Tabulka 4.1)

$$\Delta l = d_{33} \cdot U \Rightarrow d_{33} = \frac{\Delta l}{U} = \frac{k \cdot \Delta U}{U} = \frac{50 \cdot 10^{-13} \cdot 6,33}{1000} = 316 \cdot 10^{-12} C \cdot N^{-1}$$

6.2.1.4 Dosažené výsledky

V Tabulce 4.14 je uveden přehled vypočtených piezoelektrických nábojových konstant pro všechny měřené vzorky.

Tabulka 4.14: Vypočtené nábojové koeficienty

č.	$d_{33} [C \cdot N^{-1}]$
1	$428 \cdot 10^{-12}$
2	$416 \cdot 10^{-12}$
3	$309 \cdot 10^{-12}$

6.2.1.5 Nejistoty měření

Ukázkové příklady výpočtu nejistot jsou uvedeny pro vzorek č.2 z tabulky měřených prvků, přehled celkových nejistot metody je uveden na konci této kapitoly.

a) Nejistota typu A:

Aritmetický průměr se určí podle vztahu (2.1):

$$\bar{U} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U = \frac{83,13}{10} = 8,313V$$

Mírou nejistoty jednotlivého měření je výběrová směrodatná odchylka, jejíž odhad získáme dle vztahu:

$$s(U) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (U - \bar{U})^2} = \sqrt{\frac{1}{9} \cdot 0,074} = 0,09V$$

Standardní nejistotu typu A získáme z rovnice (2.2) :

$$u_a(U) = \frac{s(U)}{\sqrt{n}} = \frac{0,074}{\sqrt{10}} = 0,029V$$

Tabulka 4.15: Tabulka pro výpočet aritmetického průměru a nejistoty typu A pro vzorek č.1

č.měření	U [V]	(U- \bar{U}) [V]	(U- \bar{U}) ² [V]
1	8,6	0,287	0,082369
2	8,25	-0,063	0,003969
3	8,26	-0,053	0,002809
4	8,17	-0,143	0,020449
5	8,44	0,127	0,016129
6	7,61	-0,703	0,494209
7	8,41	0,097	0,009409
8	8,41	0,097	0,009409
9	8,62	0,307	0,094249
10	8,36	0,047	0,002209
Σ	8,313		0,073521

b) Nejistota typu B:

Hlavním zdrojem nejistot při měření odchylky vzorku interferometrem bylo okolní rušení a teplota v místnosti. Před začátkem každého měření bylo potřeba počkat zhruba 15 minut, než se teplota v místnosti ustálila a výstupní signál z interferometru neměl stoupající charakter. Rovněž jakýkoliv pohyb v místnosti přinášel do výsledku měření chybu.

Nejprve bylo zkoušeno umístění vzorku na stole s počítačem, zde se však projevovalo rušení od počítače i od jakéhokoliv doteku se stolem. Tato chyba se eliminovala tím, že hlava interferometru byla umístěna na hliníkový nosník a měřený vzorek byl umístěn na ocelový válec, který zabránil šíření okolních vibrací. Výsledné hodnoty byly poté kvalitnějšího charakteru. Různé hodnoty zatížení neměli na výstupní signál žádný vliv.

Výrobce udává pro zvolený rozsah na kterém se měřilo, tedy od 10mV/dív od 5V/div, chybu $\pm 3\%$ z měřené hodnoty[14].

$$u_b(U) = \pm 3\% \cdot 8,313 = 0,249V$$

c) Nejistota typu C:

Kombinovaná nejistota se určí podle vztahu (2.4) :

$$u_c(U) = \sqrt{u_a^2(U) + u_b^2(U)} = \sqrt{0,029^2 + 0,249^2} = 0,251V$$

Rozšíření na větší interval se provede podle rovnice (2.5) pro koeficient rozšíření $k_r=2$.

$$U(U) = k_r \cdot u_c(U) = 2 \cdot 0,251 = 0,502V$$

d) Souhrn všech nejistot:

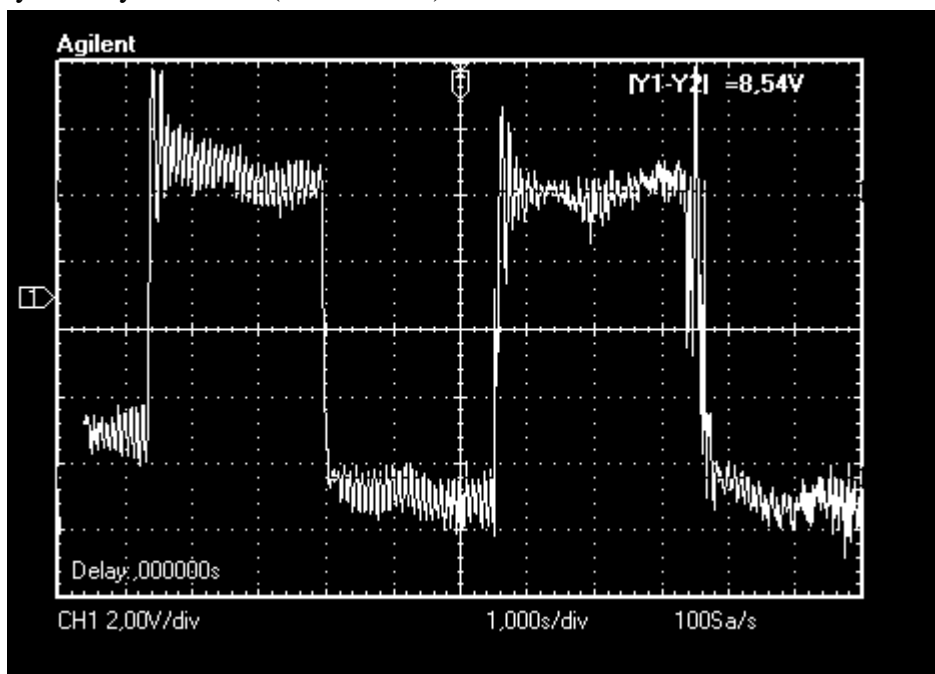
V následující tabulce je uveden souhrn všech vypočítaných nejistot pro všechny měřené vzorky dle tabulky 4.1.

Tabulka 4.16: Přehled vypočítaných nejistot při měření s interferometrem Polytec

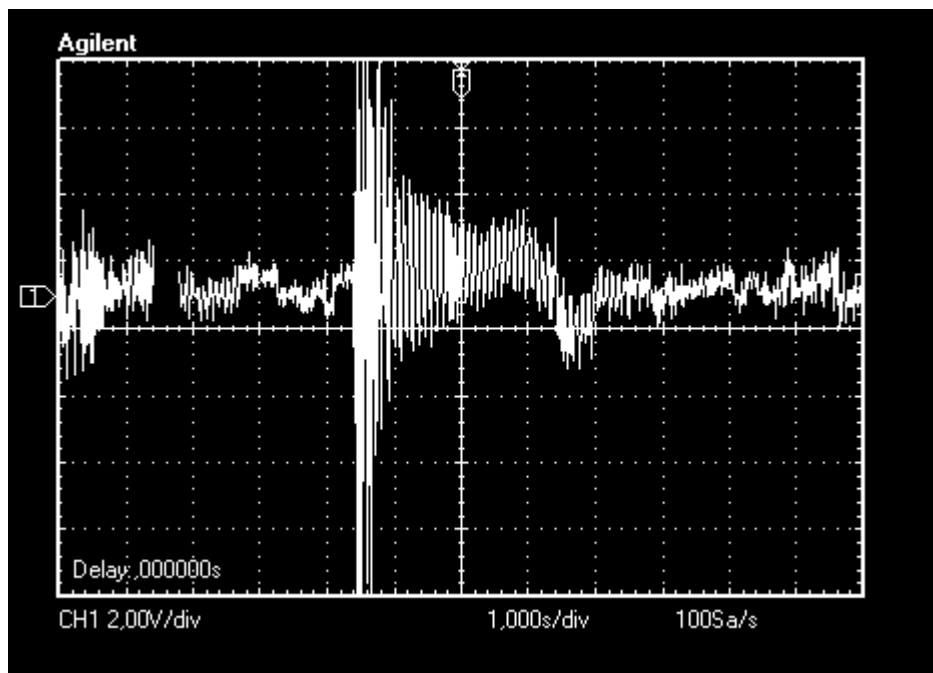
vzorek č.	1	2	3
$u_a(U)$ [V]	0,016	0,029	0,029
$u_b(U)$ [V]	0,257	0,249	0,186
$u_c(U)$ [V]	0,257	0,251	0,188
$U(U)$ [V]	0,514	0,502	0,376

6.2.1.6 Charakteristiky

Na obrázku 4.7 je zobrazen výstupní signál z interferometru při měření vzorku č.2 z tabulky měřených vzorků (Tabulka 4.1).



Obrázek 4.7: Výstupní signál z interferometru Polytec OFV-5000



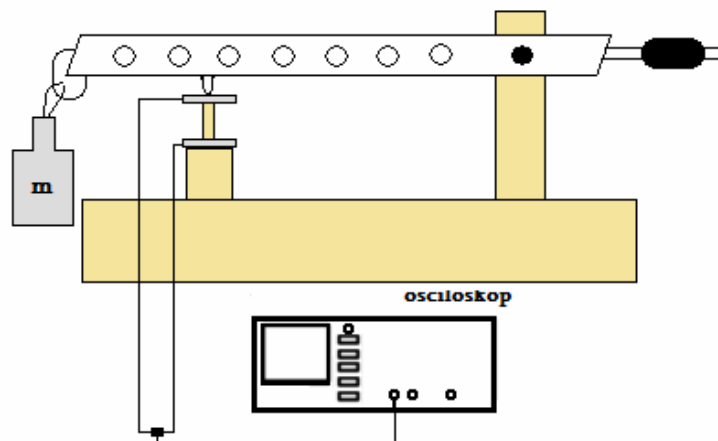
Obrázek 4.8: Výstup interferometru při odpojení napětí a dupnutí

6.3 Měření kvazistatickou metodou

Při tomto měření bylo využíváno přímého piezoelektrického jevu. Při působení mechanické síly vzniká napětí, které je měřeno voltmetrem. Měřený vzorek byl umístěn mezi dvě elektrody a to přilepením páskou, zatěžování se provádělo nejprve přiložením závaží o hmotnosti 1kg na horní elektrodu. Signály z elektrod byly koaxiálním kabelem vedeny do osciloskopu, kde byl zobrazován napěťový skok po vložení či odejmutí závaží z měřeného vzorku.

Nejprve se postupovalo tak, že závaží bylo ze vzorku odebíráno ručně, avšak při tomto postupu se nepodařilo vždy stejným nebo alespoň podobným způsobem provést zdvižení závaží. Jelikož skoková změna napětí při pokládání i odebrání závaží ze vzorku by měla být stejná, přišlo se na jiný postup, při kterém bylo použito zařízení zobrazené na obr. 4.10. Závaží bylo provázkem přivázáno na přední část, měřený vzorek byl umístěn mezi elektrody jako u předchozího postupu, vložen byl však do místa zatížení pomocného. Piezoelektrický vzorek byl zatížen závažím o hmotnosti 1kg, které bylo odstřiženo a na osciloskopu se zobrazil napěťový skok. Poloha pomocného závaží na zařízení neměla na měřenou hodnotu napětí žádný vliv.

6.3.1.1 Schéma zapojení



Obrázek 4.9. Měřící stanoviště pro měření kvazistatickou metodou

Použité přístroje: **Osciloskop** : Agilent DSO3062A

6.3.1.2 Výpočet piezoelektrického nábojového koeficientu [9]

Pro tloušťkově podélné kmity na válečku platí:

$$U = \frac{g_{33} \cdot F \cdot h}{\pi \cdot r^2} \quad (6.6)$$

Kde:

U ... napětí odpovídající zatížení [V]

g_{33} ... piezoelektrický napěťový koeficient [$V \cdot m^{-1}$]

F ... síla působící na vzorek [N]

h ... délka vzorku [m]

r ... poloměr podstavy vzorku [m]

Z definice pro volnou permitivitu platí vztah:

$$\epsilon_{33} = \frac{d_{33}}{g_{33}} \quad (6.7)$$

Kde:

ϵ_{33} ... permitivita piezoelektrického měniče [$F \cdot m^{-1}$]

g_{33} ... piezoelektrický napěťový koeficient [$V \cdot m^{-1}$]

d_{33} ... piezoelektrický nábojový koeficient [$C \cdot N^{-1}$]

Z materiálového katalogu můžeme vyčíst hodnotu poměru $\frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0}$, z toho pak zjistíme hodnotu permitivity:

$$\frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0} = 2000 \Rightarrow \epsilon_{33}^T = 2000 \cdot \epsilon_0 = 2000 \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} = 1,77 \cdot 10^{-8} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$$

Dále jelikož známe hodnotu napětí, odpovídající přiložené síle, můžeme podle vztahu (6.6) napsat:

$$g_{33} = \frac{U \cdot \pi \cdot r^2}{F \cdot h} = \frac{U \cdot \pi \cdot r^2}{m \cdot g \cdot h} \quad (6.8)$$

Nyní známe všechny potřebné hodnoty pro určení piezoelektrického nábojového koeficientu a lze ho z uvedených vztahů vypočítat.

6.3.1.3 Dosazení do daných vztahů

Dosazení bylo provedeno pro vzorek č.2 z tabulky měřených vzorků (Tabulka 4.1)

$$g_{33} = \frac{0,89 \cdot \pi \cdot (3,483 \cdot 10^{-3})^2}{1 \cdot 9,81 \cdot (14,539 \cdot 10^{-3})} = 23,8 \cdot 10^{-3} \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$\epsilon_{33}^T = \frac{d_{33}}{g_{33}} \Rightarrow d_{33} = \epsilon_{33}^T \cdot g_{33} = 1,77 \cdot 10^{-8} \cdot 23,8 \cdot 10^{-3} = 421 \cdot 10^{-12} \text{ C} \cdot \text{N}^{-1}$$

6.3.1.4 Dosažené výsledky

Tabulka 4.17: Vypočtené piezoelektrické nábojové koeficienty

Vzorek č.	$d_{33} [\text{C} \cdot \text{N}^{-1}]$
2	$446 \cdot 10^{-12}$
3	$223 \cdot 10^{-12}$

6.3.1.5 Nejistoty měření

Ukázkové příklady výpočtu nejistot jsou uvedeny pro vzorek č.2 z tabulky měřených prvků.

a) Nejistota typu A:

Aritmetický průměr se určí podle vztahu (2.1) :

$$\bar{U} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U = \frac{9,44}{10} = 0,944V$$

Mírou nejistoty jednotlivého měření je výběrová směrodatná odchylka, jejíž odhad získáme dle vztahu:

$$s(U) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (U - \bar{U})^2} = \sqrt{\frac{1}{9} \cdot 0,011} = 0,034V$$

Standardní nejistotu typu A získáme rovnice (2.2) :

$$u_a(U) = \frac{s(U)}{\sqrt{n}} = \frac{0,034}{\sqrt{10}} = 0,011V$$

Tabulka 4.18: Tabulka pro výpočet aritmetického průměru a nejistoty typu A pro vzorek č.2

č.měření	U [V]	(U- \bar{U}) [V]	(U- \bar{U}) ² [V]
1	1,1	0,1565	0,024492
2	0,89	-0,0535	0,002862
3	1,02	0,0765	0,005852
4	0,96	0,0165	0,000272
5	0,825	-0,1185	0,014042
6	1,12	0,1765	0,031152
7	0,81	-0,1335	0,017822
8	0,85	-0,0935	0,008742
9	0,94	-0,0035	0,000012
10	0,92	-0,0235	0,000552
Σ	0,9435		0,01058

b) Nejistota typu B:

Za největší chybu při měření napětí odpovídající přiložené síle se dá považovat způsob zatížení měřeného vzorku. To bylo nejprve prováděno ručním nandáváním závaží o definované hmotnosti (1kg), ale nedocílilo se toho, aby se závaží vždy stejně nandalo nebo odejmulo z měřeného vzorku. To bylo vyřešeno použitím pomocného zařízení, díky němuž se sjednotil způsob odejímání závaží ze vzorku. Výrobce udává pro zvolený rozsah na kterém se měřilo, tedy od 10mV/dív od 5V/dív, chybu $\pm 3\%$ z měřené hodnoty [14].

$$u_b(U) = \pm 3\% \cdot 0,9435 = 0,028V$$

c) Nejistota typu C:

Kombinovaná nejistota se určí podle vztahu (2.4) :

$$u_c(U) = \sqrt{u_a^2(U) + u_b^2(U)} = \sqrt{0,011^2 + 0,028^2} = 0,030V$$

Rozšíření na širší interval se provede podle rovnice (2.5) pro koeficient rozšíření $k_r=2$.

$$U(U) = k_r \cdot u_c(U) = 2 \cdot 0,030 = 0,060V$$

d) Souhrn všech nejistot:

V následující tabulce je uveden souhrn všech vypočítaných nejistot pro všechny měřené vzorky dle tabulky 4.1.

Tabulka 4.19: Přehled vypočítaných nejistot při měření kvazistatickou metodou

vzorek č.	2	3
$u_a(U)$ [V]	0,011	0,005
$u_b(U)$ [V]	0,028	0,011
$u_c(U)$ [V]	0,030	0,012
$U(U)$ [V]	0,060	0,024

6.4 Srovnání všech metod

V tabulce 4.20 je uveden přehled hodnot piezoelektrického nábojového koeficientu získaných ze všech uskutečněných měření spolu s katalogovou hodnotou pro daný typ piezokeramiky. Číslem 1 je označena přímá metoda, při níž bylo použit RLC metr, metoda s použitím generátoru a voltmetru je označena číslem 2, měření pomocí impedančního analyzátoru má číslo 3. Přímá metoda, tedy metoda, při které byl použit interferometr má číslo 4 a číslem 5 je označeno měření kvazistatickou metodou.

Tabulka 4.20: Výsledné hodnoty vypočítané piezoelektrické nábojové konstanty porovnané s hodnotou udávanou výrobcem

Metoda č.		1	2	3	4	5	Hodnota udávaná výrobcem
vzorek č.1	d_{33} [C · N ⁻¹]	$393 \cdot 10^{-12}$	$369 \cdot 10^{-12}$	$353 \cdot 10^{-12}$	$428 \cdot 10^{-12}$	-	$425 \cdot 10^{-12}$
vzorek č.2	d_{33} [C · N ⁻¹]	$399 \cdot 10^{-12}$	$382 \cdot 10^{-12}$	$386 \cdot 10^{-12}$	$416 \cdot 10^{-12}$	$446 \cdot 10^{-12}$	$425 \cdot 10^{-12}$
vzorek č.3	d_{33} [C · N ⁻¹]	$215 \cdot 10^{-12}$	$224 \cdot 10^{-12}$	$232 \cdot 10^{-12}$	$309 \cdot 10^{-12}$	$223 \cdot 10^{-12}$	$315 \cdot 10^{-12}$

Z uvedené tabulky je vidět, že nejbližší se katalogovým hodnotám přiblížilo přímé měření (číslo 4), které je i přes řadu rušivých vlivů nejpřesnější. Tyto vlivy však nemají takový důsledek na výsledky měření jako například u frekvenční metody, u níž se rezonanční a antirezonanční frekvence zjišťovaly pomocí generátoru a voltmetru (číslo 2). Zde je vysoký rozdíl od hodnot udávaných výrobcem dán zejména nedokonalým uchycením vzorku.

Jako referenční lze brát hodnoty získané z měření na impedančním analyzátoru, kde se naměřená data přímo zobrazila na displeji přístroje a působení rušivých vlivů zde nebylo téměř žádné. Odklon od katalogových hodnot lze přisoudit tomu, že měřené vzorky byly dříve podstoupeny měření při teplotě blízké Curieho teplotě, tudíž mohli ztratit piezoelektrické vlastnosti.

7 ZÁVĚR

Tato práce se zabývá metodami měření piezoelektrického nábojového koeficientu a nejistotami měření těmito metodami.

V úvodu práce je rozebrán piezoelektrický jev, používaná piezokeramika, náhradní schéma piezoelektrického rezonátoru a dále jsou popsány konstanty, které charakterizují piezoelektrický materiál a to zejména piezoelektrická nábojová konstanta.

Nejprve jsou teoreticky rozebrány vhodné měřicí metody a jejich použití, v další části je ukázáno jejich praktické využití k dosažení hodnoty piezoelektrického nábojového koeficientu. U každé metody jsou spočítány a diskutovány nejistoty jednotlivých měření.

V poslední části je celkový přehled všech měření a jsou uvedeny výhody a nevýhody jednotlivých metod.

8 LITERATURA

- [1] **HIRŠL J., ČERNOHLÁVEK D.** *Keramická piezoelektrika*, Tesla, Praha 1970
- [2] **IEEE STANDART ON PIEZOELECTRICITY**, *ANSI/IEEE Std 176-1978*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. New York 10017, USA
- [3] **ČESKÁ TECHNICKÁ NORMA** *Piezoelektrické vlastnosti keramických materiálů a součástek, Část 1: Termína a definice*, ČSN EN 50324-1:2002, Český normalizační institut
- [4] **ČESKÁ TECHNICKÁ NORMA** *Piezoelektrické vlastnosti keramických materiálů a součástek, Část 2: Metody měření – Nízký výkon*, ČSN EN 50324-2:2002, Český normalizační institut
- [5] **PIEZOCERAM s.r.o.**, *Material Datasheet* [online]
URL:<<http://www.piezoceram.com>>
- [6] **HIOKI**, 3522-50, 3532-50 *LCR HiTESTER* [online]
URL:<http://www.hioki.com/product/pdf/3522-50E4-5ZE-03P_web.pdf>
- [7] **POLYTEC**, *OFV-500 Vibrometer Controller* [online].[cit. 2003-12]
URL:<http://www.polytecpi.com/PDF/OFV-5000_Cont_Head_Decoders.pdf>
- [8] **ERHART J.**, *Piezoelektrické „chytré“ materiály pro elektrotechniku – PZT keramika*, Technická univerzita v Liberci, Elektro číslo 11/2002 [online] URL:<<http://ww.odbornecasopisy.cz/download/el110204.pdf>>
- [9] **APC INTERNATIONAL** *Piezoelektric Ceramics: Principles and Applications*, 2002[online] URL:<<http://www.americanpiezo.com/>>
- [10] **STANĚK F.**, *Ultrazvukové sondy pro lékařskou techniku*, Časopis „Jemná mechanika a optika“ číslo 6,9/1982
- [11] **HRUŠKA K., BRADÍK J.**, *Stanovení nejistot při měření parametrů jakosti*, VUT Brno, 2001

- [12] **PALEŇČÁŘ R., VDOLEČEK F., HALAJ M.,** *Nejistoty měření I až V*, soubor článků v časopise AUTOMA, č.7-8/2001, č.10/2001, č.12/2001, č.4/2002 a č.5/2002.
- [13] **AGILENT,** *Produkt Agilent 34410A* [online]
URL:<<http://www.home.agilent.com/agilent/product.jsp?pn=34410A&cc=CZ&lc=eng>>
- [14] **AGILENT,** *Produkt Agilent DSO3062A* [online]
URL:<<http://www.home.agilent.com/agilent/product.jsp?nid=-33863.536905607.00&lc=eng&cc=CZ>>
- [15] **WAANDERS J.W.,** „*Piezoelectric Ceramics: Properties and Applications*”, First edition 4-91, Philips Components, Eindhoven – The Netherlands, 9398-651-80011
- [16] **KAZELLE J.,** „*Fyzika a technologie elektrotechnických materiálů*”, VUT Brno 1998
- [17] **ŠTOLL I.,** „*Fyzika pro netechnické obory SOŠ A SOU*”, Prometheus 2000
- [18] **IEC 60483 (1976-01),** *Guide to dynamic measurements of piezoelectric ceramics with high electromechanical coupling*, IEE Central Office Geneva Switzerland 1992

Seznam použitých symbolů

Symbol	Význam	Jednotka SI
C	Kapacita, capacitance	F
C^T	Volná kapacitance	F
d	Průměr	mm
d_{ij}	Piezoelektrický nábojový koeficient	$C \cdot N^{-1}$
f	Frekvence, kmitočet	Hz
f_a	Antirezonanční frekvence	Hz
f_r	Rezonanční frekvence	Hz
f_p	Paralelní rezonanční frekvence	Hz
f_s	Sériová rezonanční frekvence	Hz
F	Síla působící na vzorek	N
g_{ij}	Piezoelektrický napěťový koeficient	$Vm \cdot N^{-1}$
h	Tloušťka	mm
h_{ij}	Piezoelektrická deformační konstanta	$V \cdot m^{-1}$
k_r	Koeficient rozšíření	
k_{33}	Podélný koeficient vazby	
l	Délka prvku	mm
Q	Náboj vyvolaný tlakem na vzorek	C
Q_m	Činitel mechanické jakosti	
U	Elektrické napětí	V
$u_a(x)$	Nejistota typu A	
$u_b(x)$	Nejistota typu B	
$u_c(x)$	Nejistota typu C	
Z	Impedance	Ω
ϵ_{ij}	Permitivita piezoelektrického měniče	$F \cdot m^{-1}$
ϵ_r	Relativní permitivita	
ϵ_0	Permitivita vakua	$F \cdot m^{-1}$
ρ	Hustota materiálu	$kg \cdot m^{-3}$
π	Konstanta 3,1415...	

9 PŘÍLOHY

PROPERTIES OF PIEZOCERAMIC MATERIALS

Property	Symbol & Unit	High Power Materials			High Sensitivity Materials		
		PCM-40	PCM-41	PCM-80	PCM-50	PCM-51	PCM-55
DIELECTRICAL DATA							
Permittivity	$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	1250	1400	1000	1700	2000	4900
Dielectric Loss Factor	$\text{tg}\delta [10^{-4}]$	40	40	20	180	190	220
Dielectric Loss Factor (at 400 V/mm)	$\text{tg}\delta (4) [10^{-4}]$	150	200	100	-	-	-
ELECTROMECHANICAL DATA							
Coupling Factor	K_p	0,56	0,58	0,51	0,64	0,64	0,62
Coupling Factor	K_{31}	0,32	0,34	0,30	0,36	0,37	0,39
Coupling Factor	K_{33}	0,67	0,68	0,64	0,72	0,74	0,70
Piezoelectric Charge Constant	$-d_{31} [10^{-12} \text{ C/N}]$	125	135	95	180	200	325
Piezoelectric Charge Constant	$d_{33} [10^{-12} \text{ C/N}]$	290	315	225	385	425	630
Piezoelectric Voltage Constant	$-g_{31} [10^{-3} \text{ Vm/N}]$	11.3	10.9	10.7	12.0	11.3	7.5
Piezoelectric Voltage Constant	$g_{33} [10^{-3} \text{ Vm/N}]$	26.2	25.4	25.4	25.6	24.0	14.5
MECHANICAL DATA							
Elastic Compliance	$s_{11}^E [10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}]$	13.4	14.1	11.5	16.6	16.2	15.8
Elastic Compliance	$s_{33}^E [10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}]$	17.0	17.9	13.5	19.1	18.7	18.7
Radial Frequency Constant	$N_p^E [\text{m/s}]$	2180	2220	2300	1980	1970	1980
Thickness Frequency Constant	$N_t^D [\text{m/s}]$	2050	2000	2080	1880	1890	2150
Transverse Frequency Constant	$N_1^E [\text{m/s}]$	1560	1500	1690	1400	1420	1780
Longitudinal Frequency Constant	$N_3^D [\text{m/s}]$	1750	1700	1800	1400	1400	-
Mechanical Quality Factor	Q_m	500	1400	1000	80	80	70
Density	$\rho [10^3 \text{ kg/m}^3]$	7.65	7.85	7.60	7.65	7.70	8.0
THERMAL DATA							
Curie Temperature	$T_c [^\circ\text{C}]$	325	290	315	360	340	170

Data determined according to the IEC Standard 483, at $20 \pm 5^\circ\text{C}$, 24 h after poling.

For more information please consult our website:

www.piezoceram.com

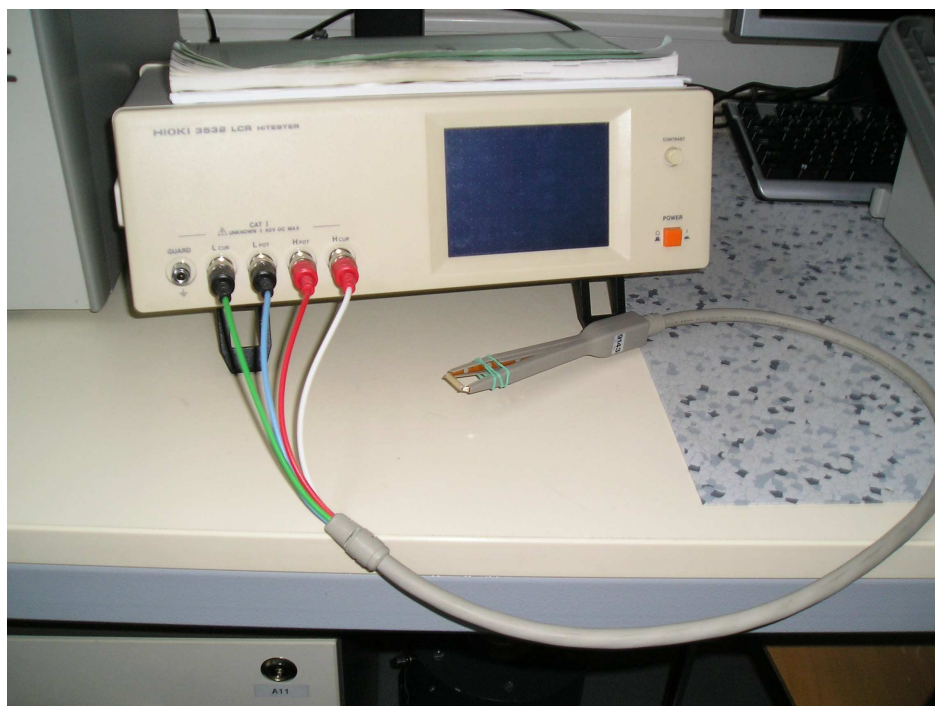
Office:
PIEZOCERAM, s.r.o.
 Sušilova 1337
 500 02 Hradec Králové
 Czech republic

E-mail: sales@piezoceram.com
Website: www.piezoceram.com
Phone: +420 49 618 939
 +420 49 563 0388
Fax: +420 49 618 939
Mobile: +420 602 113 024
 +420 602 866 203

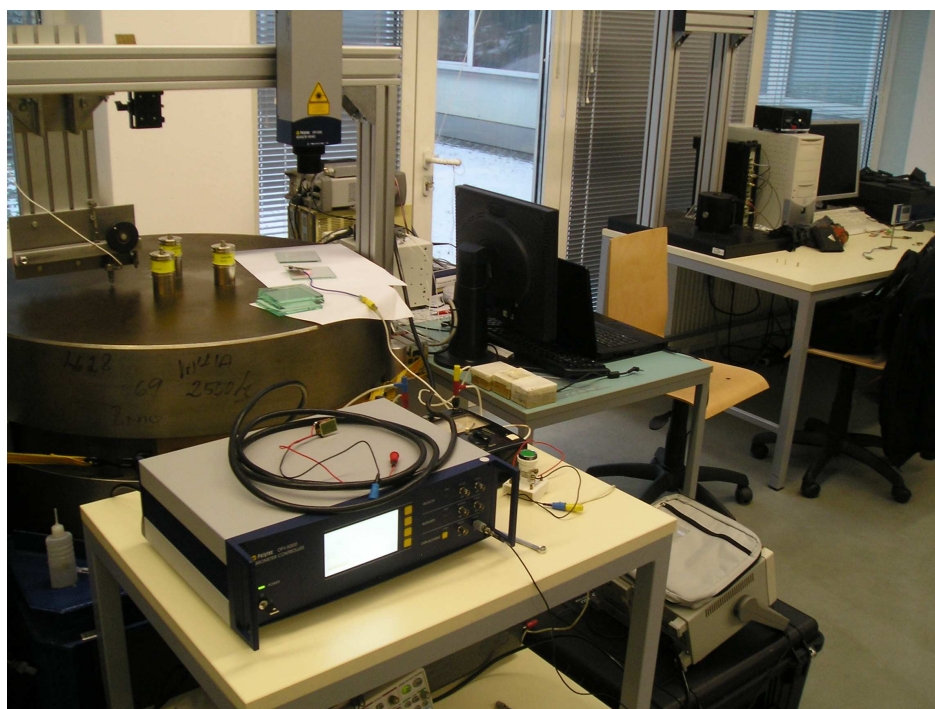
Plant:
PIEZOCERAM, s.r.o.
 Školní 86
 503 44 Libřice
 Czech republic

E-mail: plant@piezoceram.com
Website: www.piezoceram.com
Phone: +420 49 592 1980
 +420 49 592 1420
Fax: +420 49 592 1980
Mobile: +420 604 974 784

Obrázek 9.1: Datasheet od firmy PIEZOCERAM s.r.o. [5]



Obrázek 9.2: Měřící pracoviště metody s RLC metrem HIOKI 3532



Obrázek 9.3: Měřící stanoviště pro měření přímou metodou s interferometrem